

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор Інституту теоретичної
фізики ім. М.М.Боголюбова
НАН України
академік НАН України

Загородній А.Г.



АНОТОВАНИЙ ЗВІТ

про виконану роботу у 2020 році в рамках реалізації проєкту
із виконання наукових досліджень і розробок

Топологічні фази матерії та збудження в діраківських матеріалах, джозефсонівських
переходах та магнетиках

Назва конкурсу: Підтримка досліджень провідних та молодих учених
Реєстраційний номер Проєкту: 2020.02/0051

Підстава для реалізації Проєкту з виконання наукових досліджень і розробок (реєстраційний номер та назва Проєкту) 2020.02/0051 «Топологічні фази матерії та збудження в діраківських матеріалах, джозефсонівських переходах та магнетиках»

Рішення наукової ради Національного фонду досліджень України щодо визначення переможця конкурсу «Підтримка досліджень провідних та молодих учених» протокол від «16-17» вересня 2020 року № 21.

1. ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО ПРОЄКТ

Тривалість виконання Проєкту
Початок – дата укладання Договору про виконання наукових досліджень і розробок;
Закінчення – 2022 рік.

Загальна вартість Проєкту, грн. 8,126,450.00

Вартість Проєкту по роках, грн.:

1-й рік 850,657.00
2-й рік 3,771,838.00
3-й рік 3,503,955.00

2. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ВИКОНАВЦІВ ПРОЄКТУ

до виконання Проєкту буде залучено 9 виконавців, з них:

доктори наук 3 ;

кандидати наук 2 ;

інші працівники 4 .

Інформація про виконавців (авторів) Проєкту (в тому числі особи, які будуть залучені до виконання Проєкту за трудовим договором або угодою цивільно-правового характеру:

1. Керівник проєкту – Шарапов Сергій Геннадійович, завідувач лабораторії сильнокорельованих низьковимірних систем відділу теорії нелінійних процесів в конденсованих середовищах Інституту теоретичної фізики (ІТФ) ім. М.М. Боголюбова НАН України, доктор фіз.-мат.наук.
2. Гусинін Валерій Павлович, завідувач відділу астрофізики та елементарних частинок Інституту теоретичної фізики (ІТФ) ім. М.М. Боголюбова НАН України, доктор фіз.-мат.наук.
3. Золотарюк Ярослав Олександрович, провідний науковий співробітник Інституту теоретичної фізики (ІТФ) ім. М.М. Боголюбова НАН України, доктор фіз.-мат.наук.
4. Стародуб Іван Олексійович, науковий співробітник Інституту теоретичної фізики (ІТФ) ім. М.М. Боголюбова НАН України, кандидат фіз.-мат.наук.
5. Єршов Костянтин Васильович, молодший науковий співробітник Інституту теоретичної фізики (ІТФ) ім. М.М. Боголюбова НАН України, кандидат фіз.-мат.наук.
6. Шубний Володимир Олексійович, провідний інженер Інституту теоретичної фізики (ІТФ) ім. М.М. Боголюбова НАН України.
7. Букатова Дарина Владиславівна, інженер Інституту теоретичної фізики (ІТФ) ім. М.М. Боголюбова НАН України, студентка кафедри теоретичної та математичної фізики Київського академічного університету.
8. Німий Ігор Олександрович, студент кафедри теоретичної та математичної фізики Київського академічного університету.
9. Борисенко Єлизавета Андріївна, студентка Інституту високих технологій Київського національного університету ім. Тараса Шевченка.

3. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ГРАНТООТРИМУВАЧА ТА ОРГАНІЗАЦІЮ(Ї) СУБВИКОНАВЦЯ(ІВ) ПРОЄКТУ

Субвиконавці відсутні.

4. ОПИС ПРОЄКТУ

4.1. Мета Проєкту (до 200 знаків)

Метою проєкту є отримання кращого теоретичного розуміння топологічних фаз та збуджень у матеріалах та системах сучасної фізики конденсованих систем, передбачення нових експериментально спостережуваних ефектів та пошуки їх можливого застосування.

4.2. Основні завдання Проєкту (до 400 знаків)

1. Дослідити колапс рівнів Ландау та ефект Нернста-Еттінсгаузена у діраківських матеріалах.
2. Дослідити плазмонний спектр в драбиноподібній джозефсонівській лінії передачі (ДЛП), основна увага приділятиметься існуванню бездисперсійних плоских зон.
3. Дослідити динаміку феромагнітних та антиферомагнітних скірміонів, електронні стани у викривлених плівках.

4.3. Детальний зміст Проєкту:

- *Сучасний стан проблеми* (до 400 знаків)

Природа топологічних збуджень гарантує їх стійкість щодо зовнішніх збурень. Діраківські матеріали мають властивості топологічних ізоляторів. Суміжне поняття - топологічний перехід Ліфшиця (ТПЛ). Тому вони є ідеальними кандидатами для елементів пристроїв квантової інформації. Флюксони використовуються як носії квантового біта інформації. Магнітні солітони вони розглядаються як ключові елементи новітніх пристроїв спінтроники та комп'ютерної логіки.

- *Новизна Проєкту (до 400 знаків)*

Ми дослідимо колапс рівнів Ландау крайових станів, спіновий термомагнітний ефект у діраківських матеріалах, та спіновий ефект Нернста-Етінсгаузена. Також буде досліджено процес зчитування флюксоном стану кубіта в джозефсонівських ліній передачі та плоскі зони плазмонного спектру в ній. Крім цього, буде розглянуто ефекти кривизни плівки в динаміці феромагнітних та антиферомагнітних скірміонів, і індуковані ними деформації еластичної феромагнітної плівки.

- *Методологія дослідження (до 400 знаків)*

Дослідження діраківських матеріалів ґрунтуватиметься на аналітичному і чисельному розв'язку рівнянь. Дослідження джозефсонівських ліній передачі ґрунтувалися на аналітичному та чисельному розв'язуванні дискретного рівняння синус-Гордона. Скірміони у плівках вивчатимуться методом колективних змінних у наближенні малої кривизни.

5. ОТРИМАНІ НАУКОВІ АБО НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ (до 2 сторінок) в поточному році/ в рамках реалізації Проєкту, зокрема:

5.1. Опис наукових або науково-технічних результатів, отриманих в рамках виконання Проєкту (із зазначенням їх якісних та кількісних (технічних) характеристик)

Перспективи застосування графено-подібних матеріалів викликають великий інтерес і стимулюють подальші дослідження електронних властивостей нових алотропів графену. Розглянуто електронні стани в новому представнику родини діраківських матеріалів — тетраграфені. Отримано спектр відповідної моделі, низькоенергетичний гамільтоніан поблизу симетричних точок в зоні Бриллюена та побудовано функцію Гріна. Розраховано густину станів тетраграфену аналітично (в симетричних точках) і чисельно в повній зоні Бриллюена. Встановлено існування сингулярностей ван Хова високого порядку в спектрі квазічастинкових збуджень, виділені їхні внески до густини станів. Для обчислення орбітальної сприйнятливості тетраграфену використане нещодавно отримане в літературі узагальнення формули Ландау-Пайерлса. Розрахована орбітальна сприйнятливість в повній зоні Бриллюена як функція хімічного потенціалу і температури. Встановлено можливість фазового переходу “діамагнетизм-парамагнетизм” при критичному значенні параметру перескоку електронів між атомам і яку роль відіграють сингулярності ван Хова високого порядку в такому переході [1].

Коли до системи скінченного розміру прикладається зовнішнє магнітне поле, то енергії рівнів Ландау залежать від координати та поблизу границь зразка утворюють так звані крайові стани. Саме завдяки тому, що електрони в металах можуть займати ці стани і виникають макроскопічні діамагнітні бездисипативні незатухаючі струми, які протікають навколо країв зразка. Для дослідження фундаментальних властивостей систем у зовнішньому магнітному полі використовують циліндричну геометрію задачі, запропоновану Лафлінім, в якій магнітне поле прикладене перпендикулярно до поверхні циліндра. Розглянуто циліндр Лафліна з краями, які знаходяться у контакті з термостатами при різних температурах. Запропоновано візуалізацію ефекту Нернста з використанням ідеального оборотного термодинамічного циклу в координатах “кількість частинок — хімічний потенціал” без врахування кінетичного внеску. З використанням оберненого термодинамічного циклу розглянуто і ефект Етінсгаузена. Відповідні величини недиагональних термоелектричних коефіцієнтів представлені як відношення бюджету потоку

ентропії через систему до магнітного потоку. Наш підхід ілюструє термодинамічне походження співвідношення між ефектом Нернста та струмами намагніченості [2].

Плоскі тобто бездисперсійні зони є предметом активних досліджень в різних ділянках фізики. Досліджено властивості малоамплітудних електромагнітних хвиль або джозефсонівських плазмонів в джозефсонівській лінії передачі що являє собою квазіодновимірний масив точкових джозефсонівських контактів котрий складається з N паралельних ліній контактів з'єднаних ланками що також містять в собі джозефсонівські контакти. Показано, що спектр плазмонів містить в собі N плоских віток за умови нульового зовнішнього струму. Значення частоти на цих вітках дорівнює джозефсонівській плазмовій частоті. Прикладення зовнішнього струму знімає виродження, залишаючи лише одну плоску вітку. Решта колишніх плоских віток для помірних значень дискретності та анізотропії залишається майже плоскими слабо відхиляючись вниз від плазмової частоти. Виключенням є лише дуже дискретні масиви при зовнішніх струмах близьких до критичного струму контакту. Плазмони що відповідають плоским зонам характеризуються тим що більша кількість рядів масиву залишається незбудженими, а джозефсонівська фаза коливається лише в одному вертикальному та одному чи двох сусідніх горизонтальних рядах контактів.

Досліджено поведінку ланцюжка спінів у формі кільця з антиферромагнітним впорядкуванням та важковісною тангенційною анізотропією в зовнішньому магнітному полі. Встановлено, що у зовнішньому магнітному полі в антиферромагнітному кільці можлива реалізація трьох рівноважних станів: бінормального, їжакоподібного та квазіоднорідного. Параметр Нееля для їжакоподібного та квазіоднорідного станів лежить в площині кільця. Бінормальний стан є тривіальним і характеризується однорідним розподілом параметра Нееля вздовж вісі симетрії кільця. Цей стан є стабільним за відсутності зовнішнього магнітного поля та за полів малої інтенсивності. Їжакоподібний (нормальний) стан описується сталим розподілом параметра Нееля в локальній системі координат та є стабільним в широкому діапазоні зовнішніх полів і для кілець з кривиною, меншою за критичну кривину. Квазіоднорідний стан (відносно лабораторної системи координат) характеризується утворенням двох антиферромагнітних доменних стінок поперечного (*head-to-head* і *tail-to-tail*) типу.

Визначено області стабільності цих станів в залежності від кривини кільця та інтенсивності зовнішнього магнітного поля. Побудовано фазову діаграму рівноважних станів. Аналітично отримані результати підтверджено за допомогою спін-граткових моделювань. Встановлено, що для кілець малої кривини критичне значення зовнішнього поля, необхідне для перемикання системи з бінормального стану в нормальний, є порівняно невеликим, і зменшується зі зменшенням кривини кільця.

Результати представлені у двох статтях, направлених до друку та оприлюднених на ресурсі arxiv.org. Одна стаття готується до друку.

1. D.O. Oriekhov, V.P. Gusynin, and V.M. Loktev, Orbital susceptibility of T-graphene: Interplay of high-order van Hove singularities and Dirac cones, направлено до друку. Preprint arXiv:2009.05612 (2020).

2. S.G. Sharapov, A.A. Varlamov, C. Goupil, A.V. Kavokin, The thermodynamic approach to the Nernst and Ettingshausen effects in the Laughlin geometry, направлено до друку. Preprint arXiv:2010.01853 (2020).

5.2. За наявності науково-технічної продукції обґрунтування її переваг у порівнянні з існуючими аналогами

Проект є фундаментальним тому наукова продукція (окрім звіту та наукових статей) не передбачається.

5.3. Практична цінність отриманих результатів реалізації Проєкту для економіки та суспільства (стосується проєктів, що передбачають проведення прикладних наукових досліджень і науково-технічних розробок)

Проєкт не містить прикладних наукових досліджень і науково-технічних розробок.

5.4. Опис шляхів та способів подальшого використання результатів виконання Проєкту в суспільній практиці.

Отримані результати будуть направлені до друку у провідні світові наукові журнали, загалом направлено 2 статті. Ці статті також оприлюднені у відкритому доступі на ресурсі наукових препринтів arXiv.org. Планується своєчасне розповсюдження інформації про наукові результати та презентації учасників на наукових заходах (семінари, наукові збори, конференції).

Примітка: Анотований звіт не повинен містити відомостей, заборонених до відкритого опублікування

Науковий керівник Проєкту

завідувач лабораторії
сильнокорельованих
низьковимірних систем відділу
теорії нелінійних процесів в
конденсованих середовищах
Інституту теоретичної фізики (ІТФ)
ім. М.М. Боголюбова НАН України

Шарапов С.Г.

ПІБ

(підпис)

С.Г. Шар 14.12.20